

Contributions des technologies de production à l’approvisionnement en électricité et à la stabilité du système électrique

Document de connaissances de base, état: janvier 2018

1. Synthèse

Afin de garantir la stabilité de l’approvisionnement en électricité, il est fondamental que l’offre (production) et la demande (charge) s’équilibrent en permanence.

Les différentes technologies de production d’électricité s’avèrent plus ou moins adaptées à la compensation de l’offre et de la demande. Celle-ci peut par exemple être effectuée sur la base de prévisions *day-ahead* et se concentrer dans une certaine mesure sur les différences «prévisionnelles» de l’offre et de la demande. La compensation peut toutefois avoir lieu pour les variations à court terme imprévues de la charge et de la production. Ainsi, pour compenser une variation se produisant en l’espace de quelques secondes ou de quelques minutes, le recours à des services-système est nécessaire.

Les trois facteurs que sont la pilotabilité, la flexibilité et la prévisibilité de la production jouent alors un rôle prépondérant. Plus une technologie de production présente ces atouts, plus elle contribue à la sécurité d’approvisionnement ainsi qu’à la bonne exploitation du réseau. Il est de ce fait essentiel, dans le cadre du développement attendu des technologies non pilotables comme le photovoltaïque ou l’éolien, que suffisamment de technologies flexibles (centrales de pompage-turbinage ou centrales à gaz à cycle combiné) soient disponibles pour assurer l’équilibre du réseau.

2. Principales contributions: garantie de l’approvisionnement et des services-système

La mission principale de l’ensemble du réseau électrique est de garantir à tout moment l’équilibre entre la demande et l’offre de façon à maintenir un approvisionnement constant et stable. Pour le consommateur, le réseau entier doit prendre l’aspect d’une source d’électricité «inépuisable» dissimulée derrière la prise, fournissant à tout instant le courant demandé. La tension et la fréquence doivent respecter certaines limites étroites, la plupart des appareils de consommation dépendant de cette stabilité pour offrir un fonctionnement correct et fiable.

Afin de garantir la stabilité des systèmes électriques, la production doit remplir deux missions principales:

1. garantir l’approvisionnement de la charge prévue (mettre la puissance et/ou l’énergie à disposition selon le programme prévisionnel);
2. garantir l’équilibre de l’exploitation du système (services-système tels que la puissance de réserve et l’énergie de réglage pour compenser les écarts par rapport aux prévisions).

La valeur SAIDI, l'indice de qualité pour l'interruption moyenne de l'approvisionnement en électricité, a été évaluée à 20 minutes à peine par an en Suisse¹, ce qui correspond à une disponibilité de 99,996%.

3. Réalité aujourd'hui

3.1 Vue d'ensemble

Les fluctuations de production et de charge, dont les causes ne sont pas liées, doivent s'équilibrer l'une l'autre. Afin de préserver à tout moment l'équilibre de l'ensemble du système, une **procédure de planification par étapes** est mise en œuvre quotidiennement:

- a) Établissement d'une prévision de charge
- b) Mise à disposition de la puissance par les centrales (programme prévisionnel)
- c) Mise à disposition de puissance de réserve et d'énergie de réglage
- d) Régulation du réseau en temps réel

En général, les planifications pour chaque quart d'heure sont réalisées un jour à l'avance (*day-ahead*). Lors d'une première étape, une **prévision de la courbe de charge** pour le jour suivant est établie sur la base de diverses informations constamment actualisées. Le jour de la semaine, l'heure, le calendrier ainsi que les prévisions météorologiques (température, rayonnement solaire et force du vent) sont notamment déterminants.

La deuxième étape consiste à mettre à disposition la **puissance par les centrales**: l'utilisation des différentes unités de productions pour l'approvisionnement de la charge attendue est planifiée. L'identification détaillée des centrales qui seront sollicitées est déterminée non seulement par la volonté de garantir la sécurité de l'approvisionnement en électricité, mais également par les prix du marché de gros.

La troisième étape vise à mettre à disposition la **puissance de réserve** et l'**énergie de réglage**. Des unités de production supplémentaires sont réservées à cette fin pour compenser les fluctuations inattendues et garantir ainsi la bonne stabilité du réseau. Peu avant la fourniture, des ajustements peuvent encore être apportés au plan d'engagement (*intra-day*, autrement dit au cours de la journée). Il existe pour cela un marché spécifique.

¹ SAIDI = System Average Interruption Duration Index. Cette valeur indique en minutes la durée moyenne par an d'interruption de l'approvisionnement en électricité par client.

Lors de la dernière étape, c'est-à-dire au moment de la fourniture de l'électricité, des mesures doivent être mises en œuvre pour réduire, en temps réel, les écarts entre la charge et la production (*balancing*). Un **système de régulation** complexe est nécessaire pour le maintien de la stabilité. En cas d'échec de l'harmonisation charge/production, l'ensemble du système risque de s'effondrer. L'exploitation du réseau doit être assurée par le gestionnaire du réseau de transport, qui, pour ce faire, a recours à des **services-système**.²

3.2 Contribution des technologies de production à la sécurité de l'approvisionnement

Trois facteurs clés déterminent les critères de qualité d'énergie des technologies de production, à savoir la **pilotabilité**, la **flexibilité** et la **prévisibilité**. Il est par conséquent important de définir de façon précise et de bien comprendre ces termes.

3.2.1 Pilotabilité de la production

Une technologie de production est considérée comme **pilotable** dès lors qu'elle est à même de fournir à la demande une puissance prescrite dans les limites de capacité pendant une fenêtre de temps souhaitée. Le rapport entre puissance assurée et puissance installée constitue une mesure de la pilotabilité d'une technologie.

L'exploitant d'une installation pilotable peut ainsi décider par lui-même si cette dernière doit, ou non, fournir de l'électricité. En règle générale, les centrales fonctionnant à l'aide d'un combustible sont pilotables. Les centrales à accumulation et les centrales à gaz en sont un parfait exemple. La production des centrales photovoltaïques et éoliennes dépend quant à elle des conditions météorologiques et n'est pas pilotable (hormis la mise hors tension externe). Leur puissance connaît des fluctuations et ne peut pas être «commandée» à l'avance (voir illustration 1).

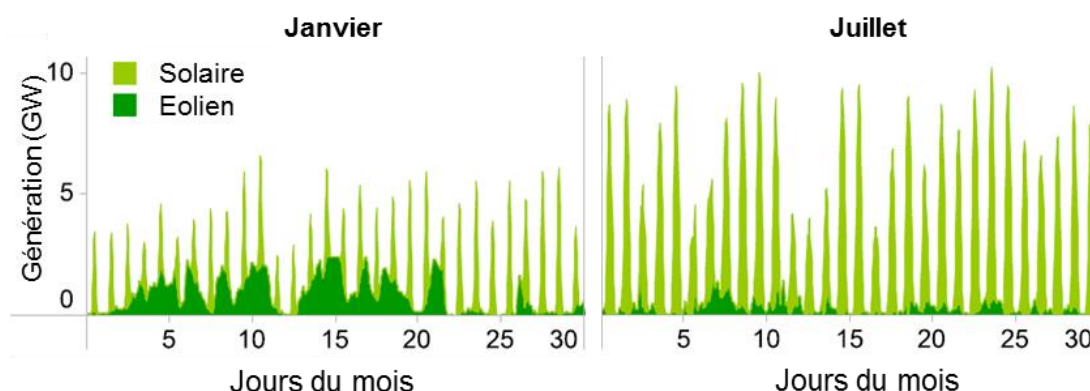


Illustration 1. Exemple de production solaire et éolienne avec des valeurs mensuelles historiques en 2008 (31 jours en janvier ou juillet) pour une capacité installée hypothétique d'environ 15 GW pour l'énergie solaire et 2,5 GW pour l'énergie éolienne. Source: AES 2012.

² Le gestionnaire de réseau de transport suisse Swissgrid définit les services-système comme suit: «Dans le cadre de l'approvisionnement en électricité, on entend par prestations de services système (SDL) les services qui sont fournis au client par les gestionnaires de réseau, en plus du transport et de la distribution d'énergie électrique. Il s'agit notamment de la mise à disposition et de l'exploitation d'un système de gestion du programme prévisionnel et de gestion des congestions, ainsi que de tâches de coordination en Suisse et en Europe. C'est toutefois l'énergie de réglage qui constitue la part la plus importante des coûts liés aux services système. Cette énergie est une sorte d'assurance contre les pannes de courant que Swissgrid contracte auprès de producteurs et consommateurs, afin de remédier aux situations de réseau critiques en cas d'événements inattendus.» (Source: www.swissgrid.ch)

3.2.2 Flexibilité de la production

Si un exploitant de centrale peut non seulement décider lui-même de la production mais également la faire varier dans le temps, la technologie de production est alors qualifiée de **flexible**. La flexibilité présuppose par conséquent la pilotabilité. Outre son temps de réponse, la flexibilité d'une centrale se mesure à sa rapidité de modification de la puissance fournie (faculté également appelée gradient de puissance, représenté par l'inclinaison des lignes dans l'illustration 2).

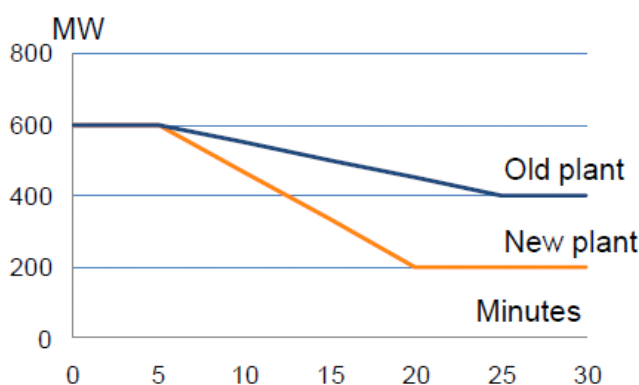


Illustration 2. Amélioration des paramètres de flexibilité des nouvelles installations (gradient de puissance et plage de puissance). Source: AES 2012.

Les turbines à gaz constituent par exemple des technologies de production non seulement pilotables mais également flexibles alors que les centrales au charbon réagissent plutôt lentement et ne sont par conséquent pas très flexibles. Contrairement aux centrales à accumulation, très flexibles, les centrales au fil de l'eau ne le sont pour l'instant guère. Pour répondre aux nouvelles évolutions telles que l'injection irrégulière de courant issu de l'éolien et du solaire ainsi qu'aux prix négatifs de l'électricité, certaines centrales au fil de l'eau n'utilisent désormais pas toujours l'ensemble des débits, contribuant par cette flexibilisation de la production à une exploitation du réseau sûre et stable.

Une technologie de production pilotable et flexible contribue activement à la stabilité du réseau.

3.2.3 Prévisibilité de la production

La **prévisibilité** d'une technologie de production peut être mesurée grâce à la précision des prévisions de son profil de production. Un élément de mesure pour la prévisibilité est l'écart moyen absolu entre la prévision de puissance (par exemple un jour à l'avance) et la puissance réalisée par rapport à la puissance installée.

L'énergie éolienne par exemple ne peut être planifiée précisément plus de quelques heures à l'avance étant donné que la production d'électricité est, dans ce cas, proportionnelle à la vitesse du vent au cube («puissance 3»). Si la vitesse du vent est multipliée par deux, la production d'énergie est alors huit fois supérieure. De faibles écarts dans les prévisions ont par conséquent un impact significatif. La production photovoltaïque est, comparativement, plus facile à planifier (voir illustration 3) vu qu'elle dépend de la position du soleil. Seule l'apparition non prévue de nuages peut entraîner un écart entre la production réelle et les prévisions.

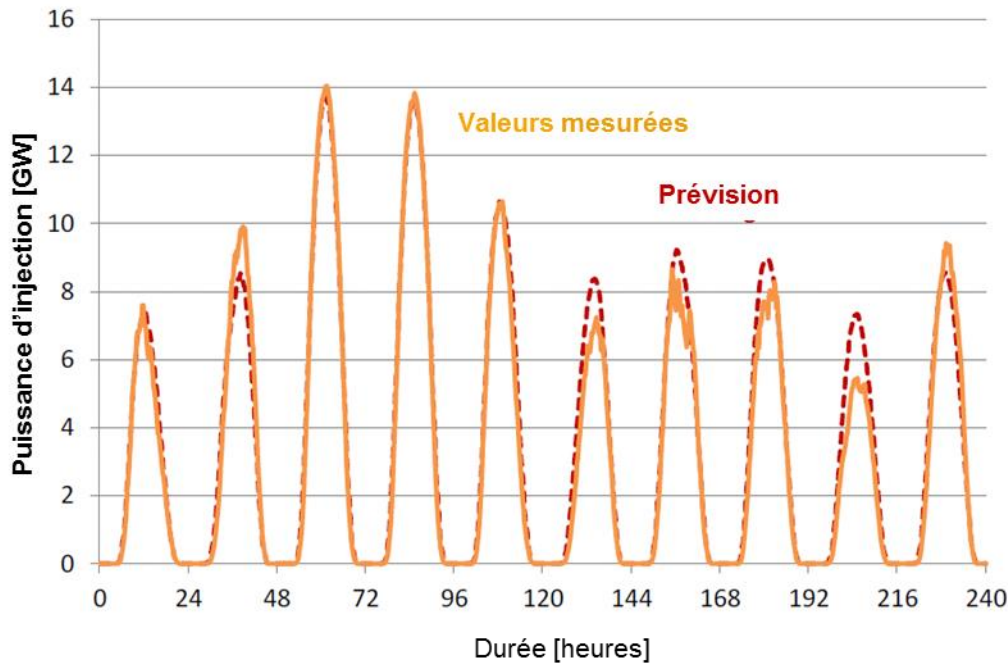


Illustration 3. Exemple de prévision et de production solaire en Allemagne réalisée sur la base des données météorologiques du 25 juin au 3 juillet 2011 (240 heures) pour une capacité hypothétique installée de 14 GW. Source: EPFZ 2011.

3.2.4 Influence de la fluctuation du volume d'électricité injecté sur le système

Les technologies de production se différencient en termes de qualité d'énergie, qui se caractérise par les facteurs prévisibilité, flexibilité et pilotabilité. Une augmentation du volume d'électricité injecté variable suite à la construction de nouvelles installations de production d'électricité éolienne et solaire s'accompagne de nouveaux défis:

- Davantage de capacités d'approvisionnement pilotable, flexible et prévisible sont nécessaires: pour les périodes durant lesquelles le volume d'électricité solaire et éolienne injecté est faible avec une utilisation au cours d'une journée, comme capacités de réserve flexibles ou comme capacités *day-ahead/intra-day*.³
- De plus, des capacités de réglage supplémentaires sont requises pour fournir des services-système puisque, par rapport à d'autres technologies, les risques d'erreur dans les prévisions sont plus élevés dans le cas de production d'énergie solaire et surtout éolienne.

En principe, un court horizon de prévisibilité diminue le besoin en services-système nécessaire à l'équilibrage énergétique du système. L'illustration 4 montre l'importance de l'influence de l'ensoleillement sur l'approvisionnement électrique. Il suffit de se pencher sur les différences d'un jour à l'autre pour comprendre dans quelle mesure la production fluctue et combien elle est peu pilotable, et voir l'importance des différences saisonnières (électricité solaire relativement basse en hiver et relativement élevée en été).

³ Il s'agit de capacités dont la puissance est commandée avec un jour d'avance ou au cours de la journée de demande.

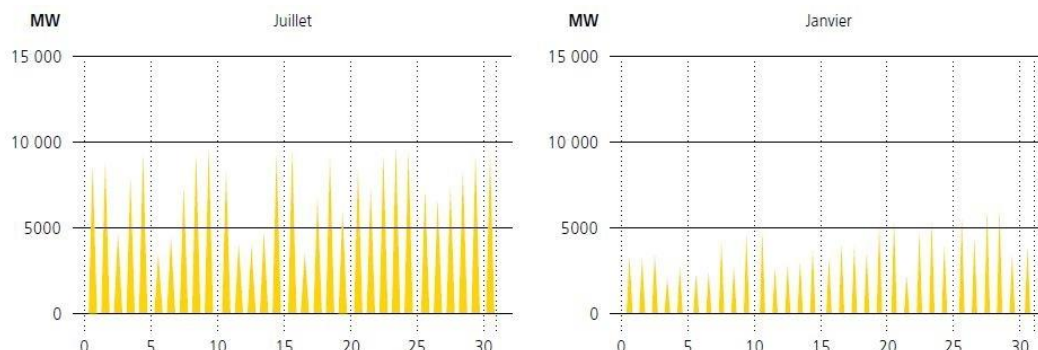


Illustration 4. Production d'installations photovoltaïques pour une future puissance installée de 14 000 MW en Suisse sur la base de données météorologiques réelles de 2008. Le graphique de gauche représente le mois de juillet, celui de droite le mois de janvier. Source: AES 2012.

Un instrument particulièrement adapté à la quantification du besoin du système en flexibilité est la **courbe de distribution annuelle** de la charge horaire sur une année. Classer les quarts d'heure dans l'ordre de charge décroissant, c'est-à-dire en fonction de la puissance nécessaire, permet d'identifier facilement l'énergie en ruban nécessaire à tout instant (illustration 5, surface grise = puissance \times durée) et la flexibilité nécessaire (écart entre P_{\min} pour la demande la plus faible, et P_{\max} pour la demande la plus élevée).

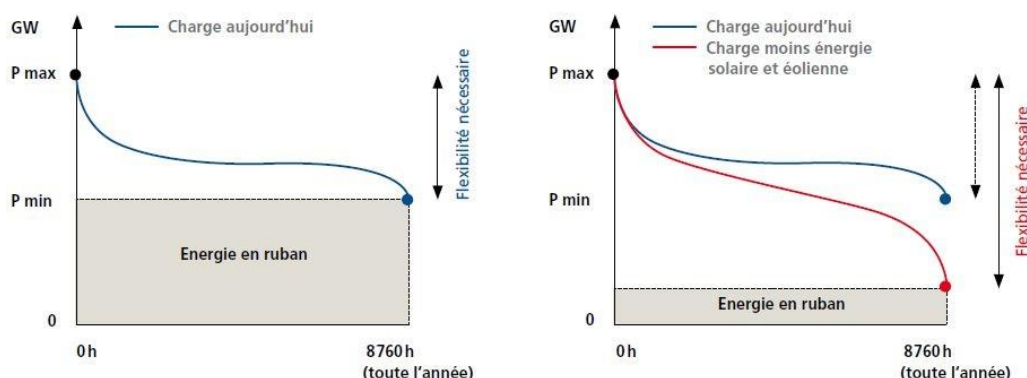


Illustration 5. Courbe de distribution annuelle de la charge et besoins en énergie en ruban sans (à gauche) et avec beaucoup de production solaire et éolienne (à droite). Source: AES 2012a.

D'une part, par son injection d'énergie, la production solaire et éolienne ne contribue que dans une mesure fort limitée à réduire l'énergie en ruban nécessaire en permanence. D'autre part, ces productions induisent des contraintes plus élevées en termes de réserve de puissance. Si l'on soustrait de la charge totale, pour chaque quart d'heure, la production éolienne et solaire non pilotable de l'énergie issue des centrales au fil de l'eau, les apports du fil de l'eau dans les centrales hydroélectriques à accumulation ainsi que la production d'autres installations produisant en continu mais non pilotables, telles que l'incinération des ordures ménagères, on obtient la **charge résiduelle ou charge nette variable**. La production pilotable doit compenser en tout temps la charge nette variable. Étant donné que les fluctuations de la production non pilotable et les fluctuations de la charge totale sont indépendantes les unes des autres, celles-ci ne se compensent pas, bien au contraire: la production pilotable doit compenser de plus grandes fluctuations de la charge nette (par rapport à la charge totale). La flexibilité nécessaire est donc d'autant plus grande (voir illustration 5).

3.2.5 Comparaison des technologies de production

Afin que l'ensemble du système puisse fonctionner, une partie de la production *doit* être pilotable, flexible et prévisible. Il s'agit là d'une contrainte physique. Ce fait est donc déterminant: plus une technologie de production est pilotable, flexible et prévisible, plus elle contribue à sécuriser l'approvisionnement et l'exploitation du système.

Les contributions des différentes technologies de production sont comparées dans l'illustration suivante.

Technologie	Prévisibilité	Pilotabilité	Flexibilité	Heures d'exploitation à pleine charge (h/a)
Centrale au fil de l'eau (grande/petite)	Grande: bonne Petite: moyenne	Non	Non	Environ 4400
Centrale à accumulation (pompage-turbinage)	Bonne	Oui	Oui	Environ 2200
Biomasse	Bonne	Oui ²⁹	Bois: limitée Biogas: oui ³⁰	5000–7000 (majoritairement en hiver)
Photovoltaïque	Modérée	Non	Non	Environ 950 (environ 1/3 en hiver)
Energie éolienne	Faible	Non	Non	1600–2000 (environ 2/3 en hiver)
Géothermie	Bonne	Oui	Limitée	6500–8000
CCF	Bonne	Limitée	Limitée	3000–4500 (environ 3/4 en hiver)
Centrale à gaz à cycle combiné	Bonne	Oui	Oui	4000–8000
Nucléaire	Bonne	Oui	Limitée	Environ 8000

Illustration 6. Comparaison de la qualité d'énergie fournie par différentes technologies. Source: AES 2012a.

3.3 Contribution des technologies de production aux services-système

Les groupes-bilan⁴ s'efforcent constamment d'assurer l'équilibre de leur charge à l'aide de leur propre production ou d'opérations commerciales. Cela n'est cependant possible que sur une durée limitée et uniquement du point de vue du groupe-bilan. C'est pour cette raison que la société suisse d'exploitation du réseau Swissgrid a pour mission d'assurer en continu l'équilibre entre la production et la charge pour la zone de réglage Suisse. Pour ce faire, elle se base sur les prescriptions de l'association des gestionnaires de réseaux de transport électriques européens REGRT-E.

3.3.1 Définition du besoin en centrales de réserve (puissance de réglage)

Avec la libéralisation du marché, les missions et les responsabilités en termes de garantie de la sécurité du réseau ont évolué en Suisse. Depuis le 1^{er} janvier 2009, Swissgrid est tenue par la loi de veiller au bon fonctionnement du système (réseau d'électricité). Dans cette fonction, Swissgrid a pour mission d'équilibrer à tout moment les écarts entre charge et production à l'aide des services-système suivants⁵:

- Réglage primaire: +/- 71 MW⁶
- Réglage secondaire: +/- 400 MW
- Réglage tertiaire: + 450 MW / - 390 MW

⁴ Un groupe-bilan est une sorte de compte de négociants et de producteurs chez le gestionnaire de réseau de transport permettant de réaliser des opérations commerciales, de prélever de l'énergie issue de centrales ou d'en fournir aux distributeurs finaux. Voir également www.swissgrid.ch.

⁵ Source: Swissgrid 2015

⁶ Quantité nécessaire pour la puissance de réglage primaire en Suisse. L'adjudication est en partie effectuée conjointement avec les pays voisins selon leurs besoins.

Le réglage primaire est fourni automatiquement et à tout moment par des centrales appropriées, qui, en réduisant ou en augmentant leur production, atténuent les écarts de fréquence du réseau par rapport à la valeur théorique de 50 Hz. Il est également possible de recourir à des adjudications avec l'Allemagne, la France et l'Autriche. Le réglage secondaire est automatiquement déclenché par le gestionnaire de réseau de transport en cas d'écarts de fréquence importants, par exemple dus soit à la défaillance d'une centrale, soit à la perte d'un gros consommateur, en raccordant ou en déconnectant des installations de production du réseau. Les producteurs réservent à cet effet des capacités de centrale (réserve de puissance) qui peuvent être utilisées en cas de besoin pendant quelques minutes. Si le réglage secondaire ne suffit pas à stabiliser le réseau, le gestionnaire de réseau de transport fait appel au réglage tertiaire qui est disponible pour une durée plus longue.

Afin que Swissgrid puisse effectivement accéder à cette puissance de réglage (ou énergie de réglage), elle doit au préalable la définir de manière contractuelle avec les producteurs d'électricité. Swissgrid achète auprès des fournisseurs de services-système une option pour l'utilisation d'énergie de réglage, à laquelle elle peut donc, en cas de besoin, recourir à court terme.⁷

Swissgrid détermine les quantités de réserve nécessaires à l'aide d'un processus mathématique qui prend en compte la probabilité définie de risque résiduel d'un surplus/déficit de puissance ne pouvant pas être équilibré.

Les critères principaux suivants s'appliquent pour le calcul de la quantité de puissance devant être mise en adjudication pour chaque produit:

Du côté du producteur	Impact sur la puissance de réglage nécessaire	
	aujourd'hui	à l'avenir
Défaillance de centrales dans la zone de réglage Suisse	en fonction de la structure du parc de centrales	en fonction de la structure du parc de centrales
Erreur de planification de productions non pilotables (centrales au fil de l'eau, éoliennes, photovoltaïques...)	faible impact	fort impact (en cas de pénétration de nouvelle production renouvelable)
Les centrales ne peuvent suivre les modifications horaires (brutales) du programme prévisionnel qu'en fonctionnement constant	fort impact	impact moyen (une production non planifiable a un effet modérateur)
Du côté de la charge	Impact sur la puissance de réglage nécessaire	
	aujourd'hui	à l'avenir
Erreur de planification du pronostic de charge (dû p. ex. à des influences météorologiques)	impact moyen	impact croissant étant donné que le pronostic de charge devient plus difficile dans le cas d'une libéralisation totale (clientèle fluctuante)

Tableau 1. Impact sur la puissance de réglage nécessaire.

⁷ Source: Swissgrid 2010

L'offre est limitée en raison des hautes exigences techniques imposées aux unités de production pour la fourniture de services-système. De plus, les possibilités de recourir à des services-système à l'étranger sont limitées.

3.3.2 Réglage primaire

Le réglage primaire se caractérise par:

- un réglage automatique piloté en fréquence disponible en l'espace de quelques secondes,
- une réserve de puissance de +/- 66 MW (fourchette de puissance de réglage symétrique), et
- une adjudication de la réserve de puissance pour la Suisse et l'Autriche, la Suisse et la France et la Suisse et l'Allemagne.

La production d'énergie de réglage primaire en Suisse est exclusivement fournie par des centrales hydrauliques (centrales au fil de l'eau et à accumulation). Une partie de la puissance de réglage primaire est mise en adjudication à l'étranger (25 MW max. en France actuellement). En Allemagne et en France, des centrales thermiques sont également utilisées pour la fourniture d'énergie de réglage primaire.

3.3.3 Réglage secondaire

Le réglage secondaire est caractérisé par:

- un réglage automatique piloté en fréquence/puissance disponible en quelques secondes ou minutes,
- une réserve de puissance de +/- 400 MW (fourchette de puissance de réglage symétrique), et
- une adjudication de la réserve de puissance uniquement en Suisse.

La production de puissance de réglage secondaire s'effectue uniquement par des centrales hydrauliques. À l'étranger, des centrales thermiques sont également utilisées à cette fin. Différentes études montrent que d'autres types de centrales (par exemple des centrales éoliennes) pourraient également être utilisés pour la production d'énergie de réglage secondaire à l'avenir. Il est toutefois difficile d'en estimer la rentabilité.⁸

3.3.4 Réglage tertiaire

Le réglage tertiaire, appelé également «réserve-minute» en Allemagne, est caractérisé en Suisse par:

- une activation manuelle du réglage sur demande de Swissgrid (les appels ont lieu pour des périodes de quelques minutes à quelques heures),
- une réserve de puissance de + 450 MW / - 390 MW (fourchette de puissance de réglage symétrique), et
- une adjudication de la réserve de puissance uniquement en Suisse.

La réserve de puissance de réglage tertiaire positive est actuellement fournie par des centrales hydrauliques alors que la réserve de puissance de réglage tertiaire négative est majoritairement fournie par des centrales nucléaires. En outre, des centrales hydrauliques (centrales à accumulation et au fil de l'eau, y compris la puissance de pompage) proposent leurs services.

⁸ Source: Europarl 2012

4. Développements futurs

Le REGRT-E souhaite que, comme c'est déjà le cas sur le marché de l'électricité, une collaboration à l'échelle européenne voie le jour sur le marché de l'énergie de réglage, et ce, tant pour des raisons de sécurité que de coûts. De premiers projets dépassant le cadre des zones de réglage, tels que l'Association nationale de réglage des réseaux, ont déjà été mis en œuvre en Allemagne. On estime aujourd'hui que cela aura pour conséquence une optimisation de l'utilisation de l'énergie de réglage au niveau international. À court terme, cela n'influera en rien sur la mise à disposition de la puissance de réglage dans les différentes zones de réglage.

4.1 Évolutions de la demande

Il n'existe aujourd'hui aucun signe précurseur d'une évolution significative de la demande en puissance de réglage (charge totale) pour les dix prochaines années. Tout au plus un rapprochement entre le marché de l'électricité *intra-day* et les offres d'énergie tertiaires est-il envisageable pour le réglage tertiaire, ce qui aurait pour conséquence une réduction de la réserve de puissance.

4.2 Évolutions de l'offre

On peut partir du principe qu'en raison des exigences techniques, aucune évolution majeure n'est à prévoir à court et à moyen terme en termes d'offre proposée par les différents types de centrales suisses en ce qui concerne le réglage primaire et secondaire. Pour ce qui est du réglage tertiaire, de nouveaux fournisseurs arrivent sur le marché du fait de nouvelles possibilités de gestion de la charge. Des efforts sont par exemple faits pour proposer également de la puissance de réglage tertiaire positive et négative via un pool de petites centrales (usine d'incinération des ordures ménagères par exemple) et de grands consommateurs d'électricité (enclenchement/coupure de la charge). Cette offre supplémentaire augmentera en continu ces prochaines années.

Dans le cadre d'une étude, l'entreprise Pöyry a évalué, sur mandat de l'AES, l'évolution future de l'offre et de la demande en capacités de production flexibles en Suisse.⁹ Elle comprend le calcul, à l'aide d'un modèle européen horaire, des changements que pourrait par exemple induire l'utilisation de centrales de pompage-turbinage en Suisse en cas de très forte croissance des capacités solaires et éoliennes. Le modèle «jour/nuit» ou «jours ouvrables/week-end» serait alors largement dépassé. Au lieu de cela, l'utilisation de centrales de pompage-turbinage s'intensifierait pour compenser les variations heure par heure de la production solaire et éolienne (illustration 7). On estime la demande en puissance de réglage supplémentaire à 8 à 10% de la capacité solaire et éolienne installée.

Les technologies de stockage d'énergie les plus intéressantes pour la Suisse sont, selon une étude de l'EPFZ, les centrales de pompage-turbinage et, à long terme, les accumulateurs à batterie.¹⁰ D'autres technologies comme l'air comprimé ou le stockage d'hydrogène semblent économiquement ou techniquement moins adaptées.¹¹ À plus long terme, le stockage d'hydrogène pourrait jouer un rôle dans le report été-hiver.

⁹ Source: AES 2012

¹⁰ Source: EPFZ 2011

¹¹ Source: Europarl 2012

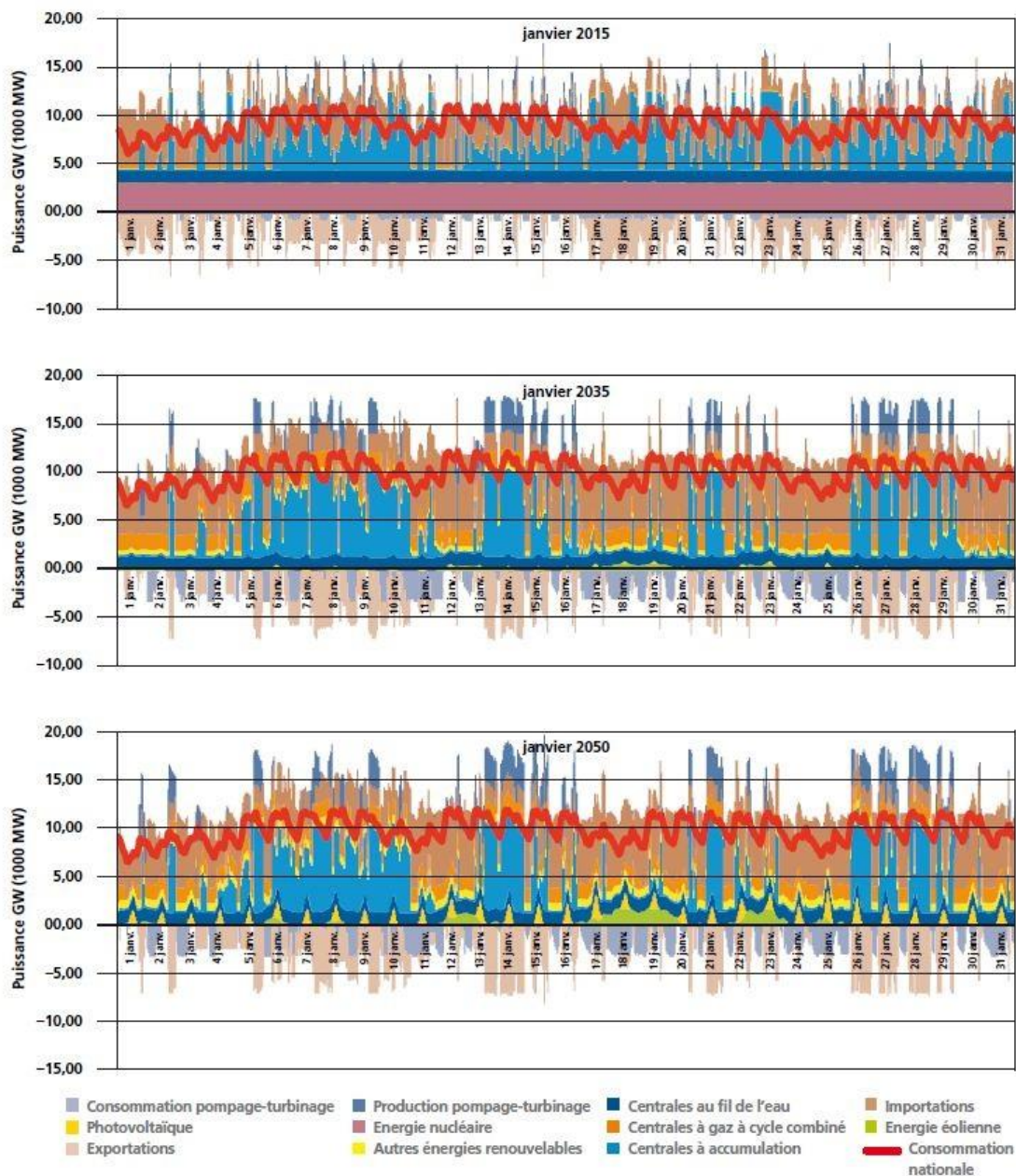


Illustration 7. Modèle de production possible en hiver pour les années 2015, 2035 et 2050. Source: AES 2012.

5. Bilan

Plus une technologie de production est pilotable, flexible et prévisible, plus elle contribue à sécuriser l’approvisionnement et l’exploitation du système. Lorsque la part de la production issue de sources d’énergie renouvelables est augmentée, le rôle des services-système revêt une plus grande importance. Les capacités supplémentaires en technologies non pilotables telles que les centrales au fil de l’eau, les centrales éoliennes et photovoltaïques sont tributaires de l’utilisation de technologies flexibles (en particulier les centrales de pompage-turbinage et au gaz) pour préserver l’équilibre du réseau.

6. Sources

AES 2012	Pöyry Management Consulting. Angebot und Nachfrage nach flexibler Erzeugungskapazität in der Schweiz. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE/AES), Aarau, 2012
AES 2012a	Scénarios pour l’approvisionnement électrique du futur, rapport global, Association des entreprises électriques suisses (AES), Aarau ; 2012
EPFZ 2011	K. Boulouchos et al., Energiezukunft Schweiz, École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ), Zurich, 2011
Europarl 2012	European Renewable Energy Network, Directorate general for internal policies, Economic and scientific policy Department, Parlement européen, Bruxelles, 2012
Swissgrid	www.swissgrid.ch (Société suisse d’exploitation du réseau)
Swissgrid 2010	Aperçu des services système, Swissgrid, Frick, 2010
Swissgrid 2015	Principes des produits de services système, Swissgrid, Frick, 2015